

A importância do design da malha de aterramento no ambiente de alta frequência.

Dissertação De Mestrado Novembro/2020

Autor: Eng^o Eletricista Eletrotécnico Jaime A. Molchansky

O projeto da malha de aterramento do Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará.

A teoria desenvolvida por Cavallius para aplicação em malhas de aterramento.

As diversas soluções que podem envolver as malhas de aterramento.

O planejamento de uma malha de aterramento com design dedicado ao amortecimento de transitórios de baixa e alta frequência é parte fundamental na infraestrutura do sistema de energia de um laboratório de alta tensão, pois neste ambiente de testes de materiais e equipamentos são geradas regularmente descargas elétricas impulsivas com tensões de alta magnitude.

Constata-se que o tema malhas de aterramento alimenta discussões e polemicas entre profissionais envolvidos com as diversas áreas da tecnologia, e ironicamente é o que geralmente recebe menos atenção na fase de planejamento das instalações elétricas.

A polêmica e confusão sobre este tema surge na própria palavra “Aterramento”, pois esta adquire diversos significados dentro da eletricidade e é empregada em um amplo espectro da tecnologia [1]. Citamos alguns exemplos destas aplicações:

A de um condutor ligado a uma ou várias hastes metálicas enterradas e que é utilizada para a proteção contra o choque elétrico nos circuitos energizados;

Nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas para o encaminhamento controlado destas ao solo.

Como um plano de terra (como referência de tensão), em uma placa de circuito digital impresso.

No casco de uma embarcação;

Na carroceria de um veículo;

Na fuselagem de uma aeronave.

Na barra de referência de tensão na origem de uma fonte de energia elétrica ou de uma instalação consumidora.

Contudo, para determinados circuitos eletrônicos sensíveis as malhas de aterramento em muitas situações podem se constituir em uma possível fonte do ruído elétrico indesejável.

Diante da constatação destas variadas aplicações e de suas complexidades surgiu uma fonte altamente instigante para o aprofundamento nas pesquisas e para o aprendizado nesta área da eletricidade.

Uma malha de aterramento adquire função importante por:

Garantir a proteção à vida das pessoas e animais, principalmente para evitar o percurso e os efeitos altamente danosos da corrente elétrica no corpo, quando este fica submetido ao contato com partes energizadas [2];

Nos requisitos de qualidade de energia para equipamentos de eletrônica sensível;

Na infraestrutura da energia de sustentação da vida dos pacientes em situação crítica nos hospitais e centros clínicos;

Para o funcionamento confiável dos dispositivos de proteção dos circuitos alimentadores de energia elétrica;

Na referência de sinais para os drivers dedicados ao controle de processos automatizados;

Na eliminação ou minimização de danos causados pelas descargas atmosféricas nas estruturas prediais, na prevenção contra incêndios;

Por Interferir no tempo de vida útil dos componentes empregados na microeletrônica.

Alguns fatos curiosos ligados ao tema da malha de aterramento, e que mostram que existem mais mitos relacionados a este assunto do que em qualquer área da engenharia elétrica, conforme seguem os mais comuns [1]:

1. “*O solo é um caminho de baixa impedância para a corrente de terra*”. Falso, a impedância da terra é maior em muitas ordens de magnitude que a impedância de um condutor comum de cobre, isto fica bastante claro quando se observa a Tab. 1 – Tipos de condutores e suas resistividades.

Condutor	Resistividade ρ (Ω/m)
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	5 a 20.000

2. “*A terra é uma equipotencial*”. Falso, isto é claramente uma inverdade como um resultado de 1.
3. “*A impedância de um condutor é determinada pela sua resistência*”. Falso, o que acontece então com o conceito de reatância indutiva?

4. *“Para operar com baixo ruído elétrico, um circuito ou sistema de energia precisam estar conectados a uma malha de aterramento”*. Falso, porque aviões, satélites, carros e computadores portáteis operam bem sem conexão a terra.

De fato, em algumas situações a malha de aterramento é a causa do ruído elétrico. Muitos dos problemas de ruído elétrico em sistemas eletrônicos são resolvidos pela remoção ou isolação de um circuito do aterramento do que pela sua conexão neste.

5. *“Para reduzir o ruído elétrico, um sistema eletrônico deveria ser conectado a uma malha com aterramento quieto e separado”, pelo uso de isoladas e separadas hastes de aterramento*. Falso, além de ser inverídico, está prática é perigosa e viola os requisitos de segurança do NEC.

6. *“A malha de aterramento é unidirecional, com corrente fluindo para o solo”*. Falso, porque a corrente na malha circula em loops.

7. *“Um receptáculo metálico isolado em relação ao circuito de sinais não está aterrado”*. Falso, neste caso o termo isolado, quando se trata de sinais elétricos, se refere ao método do aterramento para sinais, e não se este invólucro está aterrado por razões de segurança.
8. *“Um projetista pode nomear condutores de aterramento pelo tipo de corrente que eles deveriam levar (isto é, sinais, energia, descargas atmosféricas, dados digitais, dados analógicos, ruídos elétricos), e os elétrons vão cumprir e somente fluírem nos apropriados e designados condutores”*. Falso obviamente.

Parte 2- **Conceitos sobre aterramento e malhas de aterramento :**

O que é de fato aterrar?

Conforme o IEEE Std 80™-2013 [4], o aterramento é caracterizado como o ponto de ligação intencional ou acidental de um sistema elétrico e o solo local.

Na primeira situação, a ligação entre o sistema de energia e o solo se faz através de um condutor metálico.

Na segunda situação, no caso acidental, a ligação se faz pelo próprio uso do corpo das pessoas ou de animais como elemento condutor entre o sistema de energia e o solo.

“Malhas de aterramentos caem em duas categorias”:

1- Malhas de aterramento para segurança;

2- Malhas de aterramento para sinais.

Esta segunda categoria provavelmente não deveria ser chamada como malha de aterramento, mas preferivelmente como malha para retorno de sinais.

Contudo o uso comum entre os profissionais ligados as áreas de projetos e execução de instalações elétricas consagrou a expressão malha de aterramento, que se refere a todos estes usos.

De que forma uma malha de aterramento responde a fontes com frequências tão diferentes, seja no caso de prevenir contra um choque elétrico no ambiente residencial, comercial ou industrial, como no caso de manobras em linhas de transmissão ou de descargas atmosféricas?

A malha de aterramento está sujeita a diferentes solicitações por quatro fontes principais;

Dentro do sistema industrial, quando na ocorrência de defeitos para a terra.

Por tensões ou por correntes impressas, e estas fontes são basicamente representadas pelos transitórios eletromagnéticos.

Por manobras de chaveamento no sistema de potência.

Pelo escoamento e dissipação da elevação do potencial gerado por cargas eletrostáticas.

Surgem através destas fontes, eventos com larga faixa de frequências para serem conduzidos a terra e as malhas de aterramentos devem ser projetados para escoar e dissipá-los com eficiência no solo [8].

Nesta situação, na qual devem existir topologias distintas para os diferentes distúrbios, os aterramentos se complementam e são interligados através da chamada “Barra de Equipotencial Principal” – BEP pelo costume comum, e que melhor seria denominada, se esta barra fosse chamada de Barra de Referência Principal.

Como se pode entender o comportamento dos surtos ao trafegar nos condutores?

O modelo de linhas de transmissão difere do modelo ordinário de circuitos elétricos num aspecto essencial.

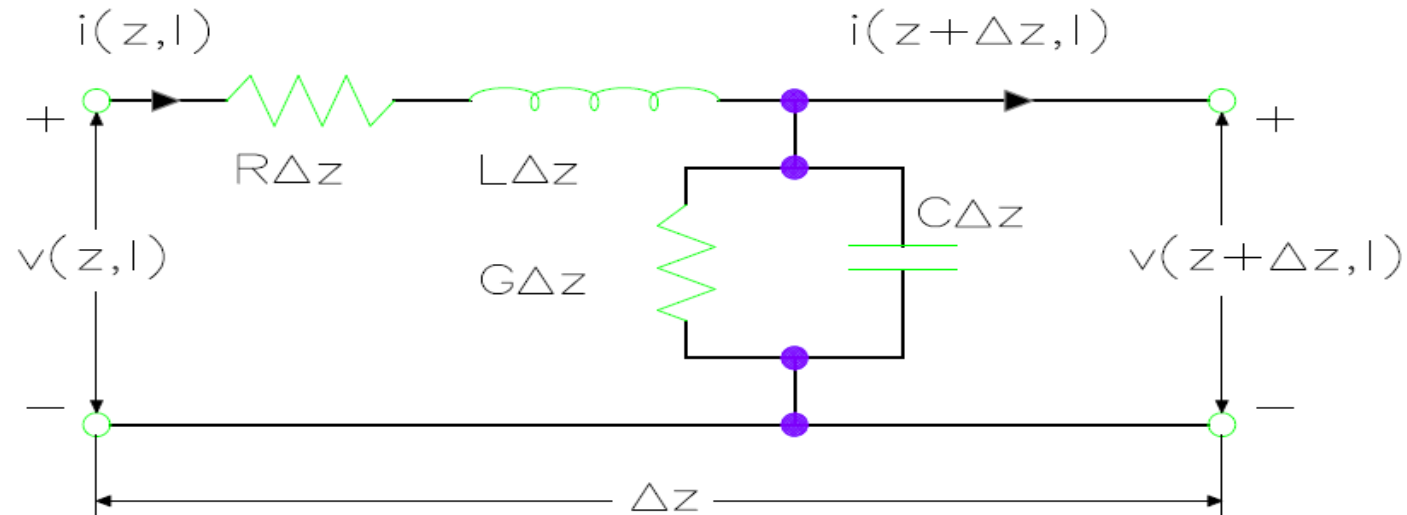
Embora as dimensões físicas das redes elétricas sejam menores que o comprimento de onda da fonte em operação, as linhas de transmissão são usualmente uma fração considerável de um comprimento de onda e pode na sua extensão ser de muitos comprimentos de onda.

Os elementos de circuitos elétricos ordinárias podem ser considerados agrupados ou discretos e desta forma descritos como parâmetros concentrados. Assume-se que a corrente fluindo nos circuitos com elementos concentrados não varia espacialmente sobre os elementos e que as ondas estacionárias não existem nesta situação [11].

Figura 1 – Representa o modelo simplificado para uma malha de aterramento para solicitações de baixa frequência.



Figura 3 – Representa o modelo de Linha de Transmissão (L.T.) com parâmetros distribuídos, condutor com baixas perdas [10] para simulação de uma Onda trafegando em um trecho de uma malha de aterramento para solicitações de alta frequência.



Neste caso consideramos um comprimento diferencial Δz para a linha de transmissão que é descrita pelos quatro seguintes parâmetros [10]:

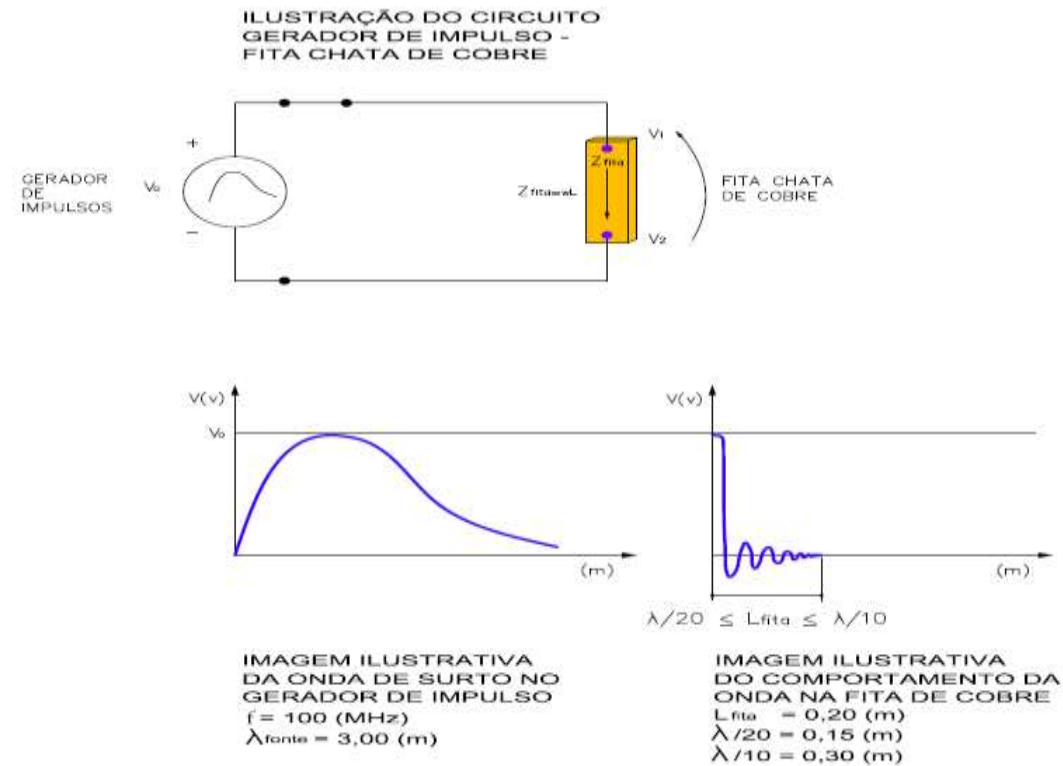
R, resistência por unidade de comprimento (em ambos os condutores), (Ω/m).

L, indutância por unidade de comprimento (em ambos os condutores), (H/m).

G, condutância (do meio) por unidade de comprimento, (S/m).

C, capacitância por unidade de comprimento, (F/m).

Figura 4 – Apresenta o esquema do circuito elaborado para a simulação; como fonte o gerador de impulso com amplitude V_0 1,0 (MV), $f = 10,0$ (MHz), e a fita de cobre utilizada na malha de aterramento projetada para o LEAT. Na sequência abaixo, a forma de onda gerada para o impulso de tensão e o comportamento da onda aplicada na fita com o amortecimento previsto na literatura.



f = 10,00 (MHz)



L - comprimento da fita de cobre (m)

Existe de fato Equipotencialidade? Ou em que limites de frequências e de comprimentos de ondas faz sentido falar de Equipotencialidade?

A palavra equipotencial está ligada ao conceito de iguais potenciais, ou melhor, à falta de diferença de potencial ou de tensão entre dois pontos. O chamado ponto de equipotencial se refere ao ponto onde a tensão não muda independente da corrente aplicada ou impressa nele [1].

Logo vem à mente a clássica imagem dos pássaros pousados sobre os cabos do sistema de distribuição de energia, nos induzindo ao uso desta expressão. Disto percebemos a ligação que nosso cérebro faz com esta imagem do cotidiano, porém este conceito de equipotencial em termos práticos, só faz sentido na baixa frequência e quando o comprimento elétrico do circuito é extremamente pequeno ($L_{\text{circuito}}/\lambda_{\text{operação}} \lll 1$).

Atente-se neste caso para o fato de que no ambiente da baixa frequência a dimensão do valor do comprimento de onda no espaço livre é maior por muitas ordens de grandeza que o comprimento dos circuitos envolvidos, e no caso dos sistemas de distribuição e transmissão o valor do comprimento de onda $\lambda = 5.000.000,00$ (m), alcança a ordem de centenas de vezes maior do que o comprimento dos cabos envolvidos nestes circuitos.

A corrente que flui através destes circuitos cujos parâmetros elétricos (RLC) são concentrados não varia espacialmente sobre estes seus elementos (“a corrente é a mesma em todas as partes do circuito”).

Tudo se passa como uma perturbação que se propaga “quase que instantaneamente” ao longo do circuito, e esta suposição somente se sustenta se o comprimento do circuito for pequeno se comparado com o comprimento de onda. Neste caso, a tensão (V) e a corrente (I) tem significados simples, são uteis e bem definidos [11] e as suas avaliações são obtidas através da teoria de circuitos elétricos. Somente dentro desta realidade, o uso da expressão equipotencial faz sentido.

Por outro lado, no ambiente da alta frequência o comprimento de onda é comparável ao comprimento do circuito, e neste caso a variação em corrente e fase do transitório em relação ao circuito torna-se significativa [11]. Sob estas circunstâncias os conceitos simples da teoria de circuitos tendem a tornarem-se inadequados e inexatos.

Deve-se notar também que nesta análise se ignora o efeito da radiação, o qual é importante nas altas frequências. Há então a necessidade de fazermos uma transição do modelo de circuitos elétricos para o modelo eletromagnético da linha de transmissão, ou seja, dos parâmetros concentrados de resistência, capacitância e indutância para o modelo com estes parâmetros distribuídos continuamente ao longo da linha de transmissão.

Em face da relevância das variações de tensão e fase em relação aos parâmetros distribuídos ao longo do circuito estabelecido para o estudo do comportamento na alta frequência, portanto, no ambiente de alta frequência perde sentido usar a expressão equipotencial.

Desta forma, o emprego corriqueiro e vulgarizado da expressão equipotencial se tornou um vício de linguagem dos profissionais da área e observa-se que o emprego da expressão equipotencial no ambiente da alta frequência gera expectativas que não serão atendidas na proteção das edificações submetidas aos transitórios, sejam eles os surtos internos que trafegam nas enfições das instalações como na dissipação de descargas na estrutura da edificação a ser protegida pelo SPDA. Surge desta má concepção os erros frequentes na coordenação de proteção dos sistemas de energia.

O aterramento para altas frequências [14] tem como objetivo a criação em sua estrutura, de ondas refletidas com polaridade contrária a onda incidente amortecendo ou anulando o surto aplicado no ponto de conexão do aterramento e ao longo da malha.

Neste caso seria muito conveniente a inclusão da palavra “amortecimento” na expressão da malha ou anel de amortecimento e aterramento [8].

Concluindo-se os comentários sobre o uso da expressão “equipotencial”, não se pode deixar de comparar com o uso corriqueiro, contudo inadequado do termo Equipotencialidade na alta frequência, com o consagrado vício de linguagem, tão comum de chamar o condutor de retorno das instalações como “Neutro”, o qual somente é Neutro na especialíssima condição de cargas trifásicas equilibradas nos circuitos de distribuição.

Capítulo III – Revisão da literatura consultada para o desenvolvimento do projeto da malha de aterramento do LEAT.

A leitura e o entendimento da teoria desenvolvida por Niels R. Hiltén-Cavallius e Trinh N. Giao [2], sob o título “Floor Net Used as Ground Return in High Voltage Test Areas”, recomendada por Pissolato, de imediato se mostrou um desafio.

A teoria de Cavallius foi o embasamento para a concepção do projeto da malha do LEAT, a qual é apresentada a seguir de forma concisa:

“Para reduzir problemas e erros de medidas durante testes de impulsos em alta tensão, modernas plantas de testes frequentemente são providas com placas de metal ou malhas colocadas no piso e utilizadas como condutor de retorno a terra”.

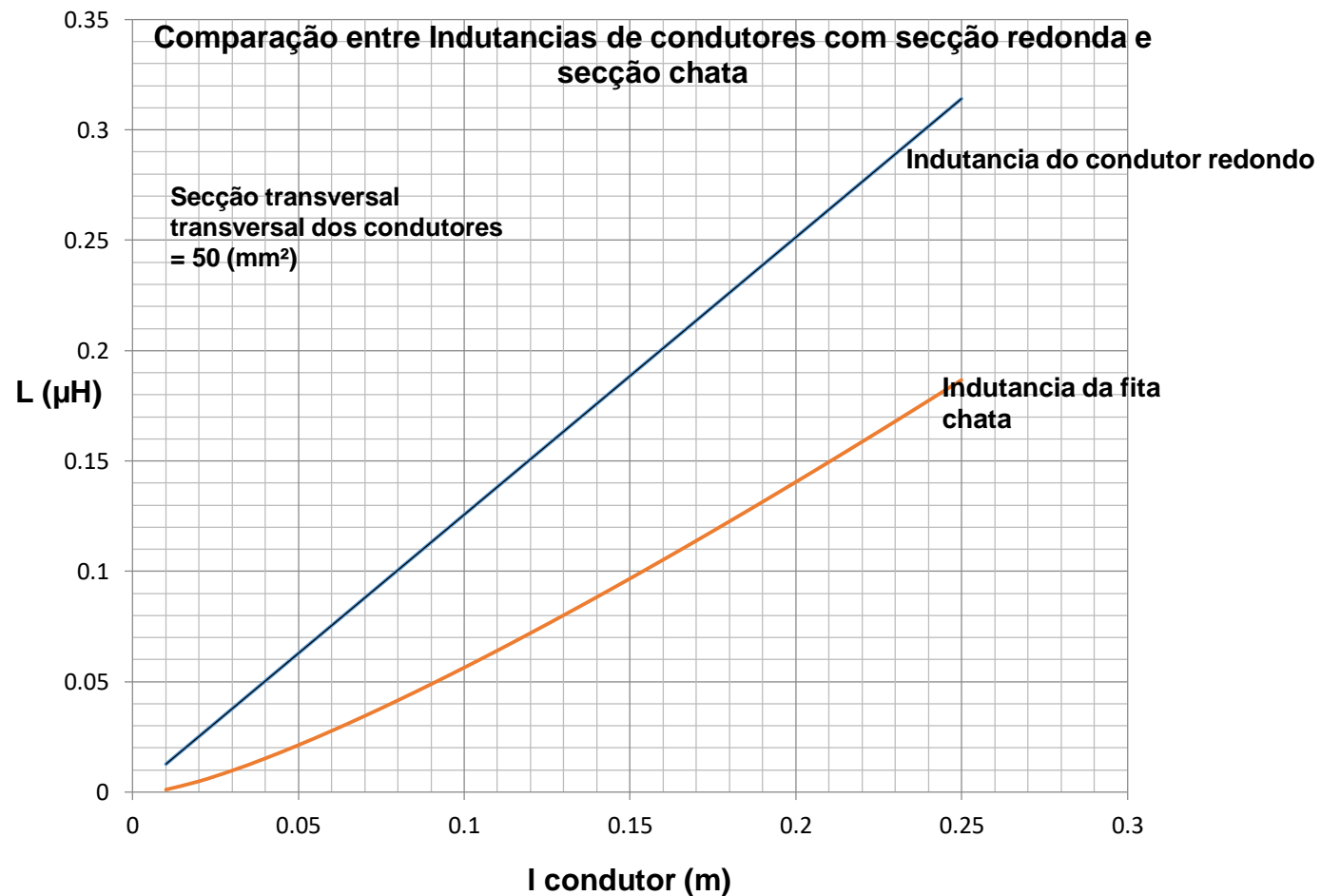
“Em um laboratório totalmente blindado e autossuficiente em termos elétricos, qualquer ligação a terra seria desnecessária”.

Entender esta observação de Cavallius tornou-se de pronto um enorme desafio e instigou a muita reflexão, pois a primeira ligação da malha de aterramento que *nos* vem à mente é a conexão intencional com o solo local, as hastes de aço cobreadas ligadas aos condutores.

Este entendimento se tornou claro pela nossa simulação nas nossas conclusões do capítulo V.

Em síntese, do texto de Cavallius foram de grande importância para o projeto da malha do LEAT, os seguintes tópicos:

A relevância do uso de fitas chatas ao invés de condutores redondos, pois para uma mesma quantidade de material empregado, a indução sobre a fita chata é significativamente menor que sobre os condutores redondos, e menor indução significa menos tensão induzida.



A importância que esta topologia de malha tem para absorver correntes dispersas (parasitas) e não apenas como retorno para a terra.

Contudo, constata-se de forma geral nas execuções de malhas a utilização quase que generalizada do uso dos condutores redondos, prática está indicada nas “receitas” de projetos das malhas das subestações e que fazem sentido apenas no ambiente da baixa frequência.

Na literatura existente sobre aterramento destaca-se o livro; EARTH CONDUCTION EFFECTS IN TRANSMISSION SYSTEMS [6], escrito pelo engenheiro Erling D. Sunde, que teve a sua primeira edição em 1949 e a segunda edição revisada pelo próprio autor em 1969. Sunde foi um pioneiro na introdução dos modelos matemáticos para aplicação em malhas de aterramento. Este livro se tornou uma verdadeira bíblia para os pesquisadores nesta área.

Outro livro que extremamente importante é Electromagnetic Compatibility escrito por Henry Ott no qual trata e explica diversas soluções para atenuação de distúrbios eletromagnéticos de alta frequência.

Figura 13 – Foto da malha de aterramento em execução. Ao fundo a malha periférica e no centro a malha de aterramento principal. Detalhe da malha principal com modulação de 0,20 x 0,20 (m) e a malha periférica lateral com modulação de 1,00 x 1,00 (m), antes do lançamento do concreto para o piso acabado.



Capítulo V – Conclusões e sugestão para trabalho posterior.

Conclusões:

As proposições iniciais deste trabalho foram totalmente atingidas. O projeto da malha de aterramento baseado na Teoria de Cavallius para o Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará foi realizado, sua malha de aterramento executada conforme projetado e este centro de pesquisas e tecnologia encontra-se em plena operação realizando regularmente os ensaios e fornecendo as certificações de seus testes.

A jornada pela busca de conhecimento técnico na academia se mostrou algo extremamente gratificante, ampliou horizontes e trouxe maior segurança profissional. O resultado final destas pesquisas poderá contribuir para todos aqueles que pretendem aumentar seus conhecimentos nesta vertente tecnológica da eletricidade para a segurança das pessoas e das instalações elétricas.

O aprimoramento acadêmico no eletromagnetismo clássico e as pesquisas que envolveram a compatibilidade eletromagnética foram fundamentais para as simulações realizadas, e que ratificaram a técnica utilizada no design da malha:

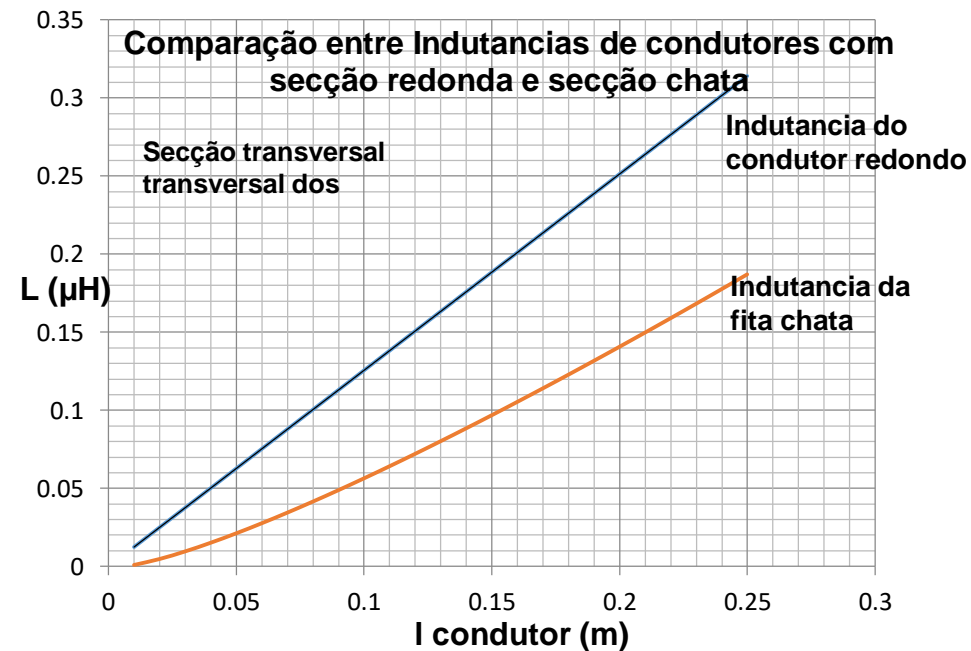
- i. A análise do tráfego de uma onda de tensão com amplitude de 1,0 (MV) e frequência de 10,0 (MHz) através de um condutor na forma de uma fita chata de cobre revelou a forte atenuação desta sobretensão aplicada, no trecho do condutor especificado.

- i. O fato desta simulação apresentar altíssimas amplitudes (valor inicial de 1,73 (MA)) e suas oscilações de corrente no trecho analisado do condutor revelam um comportamento equivalente a um curto circuito franco no trecho escolhido para a modulação em forma de grade para a malha, no qual a amplitude da tensão aplicada praticamente se anulou. Daí termos caracterizado esta malha como de “Amortecimento”.

- i. Os resultados obtidos da simulação validaram de forma prática e inequívoca a teoria desenvolvida por Cavallius e o acerto de tê-la considerado como a premissa básica para a concepção do projeto da malha de aterramento do LEAT.

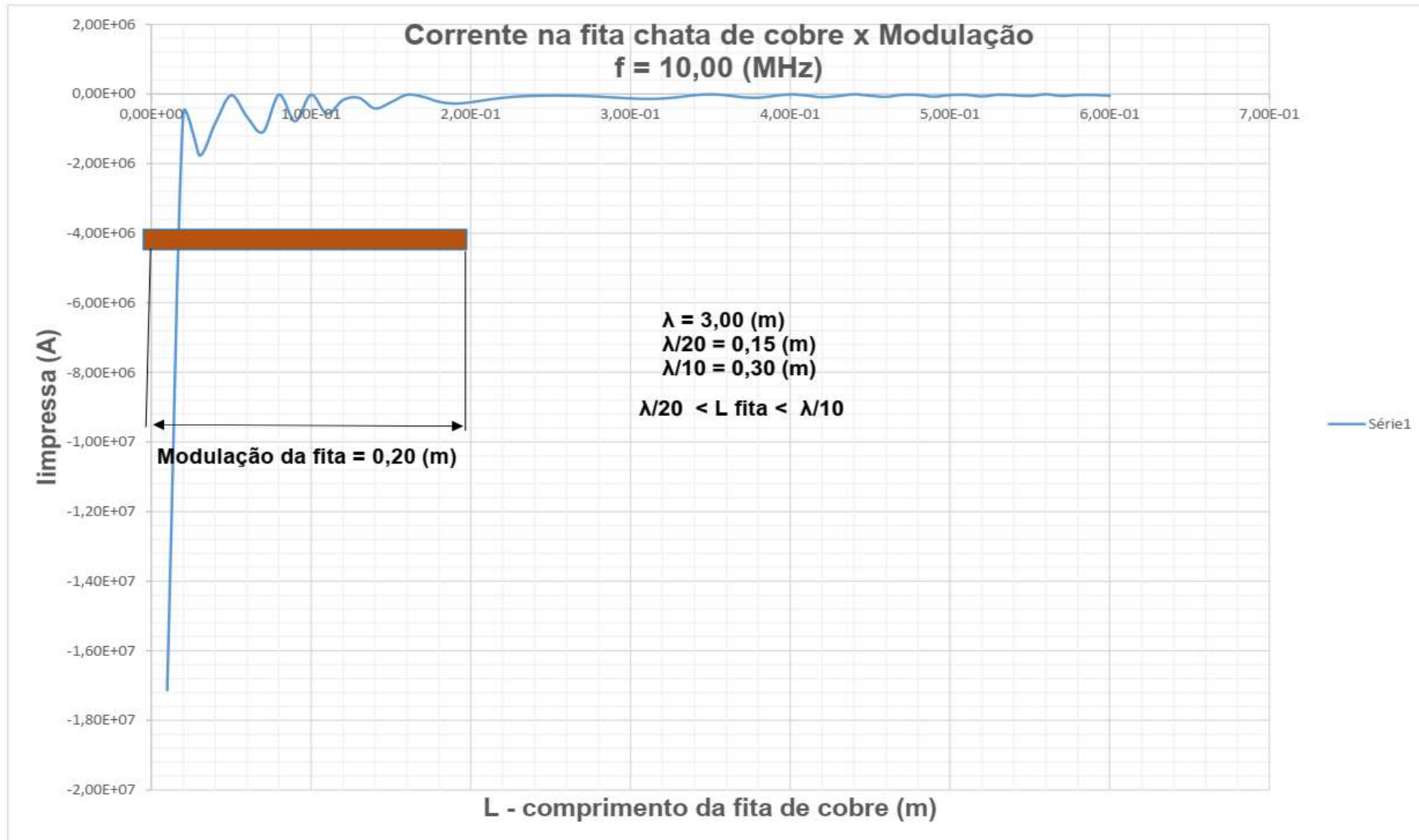
No trabalho elaborado para o LEAT foram empregados condutores de cobre com secção transversal reta ao invés de condutores redondos mostrados na publicação de Cavallius. Para balizar esta escolha, foi elaborada uma simulação que compara diferença entre as indutâncias destes tipos de condutores, ressaltando a vantagem técnica do uso de fitas chatas de cobre. A simulação desenvolvida para ilustrar esta comparação demonstra a citação de Cavallius “Menor indutância, menos tensão induzida”.

- i. A figura 6 apresenta uma comparação entre as indutâncias do condutor de secção redonda e do condutor em forma de fita chata nas mesmas secções transversais de 50,0 (mm²), considerando-se o comprimento do condutor que modula a malha de aterramento. Constatase desta simulação que a indutância do condutor de secção reta é significativamente menor, o que contribuiu para a boa performance do desempenho da malha projetada.



A análise detalhada dos parâmetros utilizados na simulação da onda de tensão através do modelo de linha de transmissão para condutores de baixas perdas explicou o que apenas é citado na literatura especializada, de que: *“A recomendação de que o comprimento dos condutores da grade da malha de aterramento deve estar no intervalo de $\lambda/20$ e $\lambda/10$ (no caso simulado entre 0,15 e 0,30 (m)), e nesta fração do comprimento da onda emitida ($\lambda/10 < L_{condutor} < \lambda/20$) haverá o amortecimento dos surtos de alta frequência”*.

Os pontos de solda exotérmica que limitam o comprimento do trecho do condutor em fita, além da função da estruturação mecânica da malha de aterramento, também têm a função de utiliza-los como contrapesos, pois estes pontos de soldas inserem uma diferença de meio condutor e provocam nestes pontos as reflexões de onda e assim atuam para o seu amortecimento conforme previsto na teoria de L. T. e tão bem ilustrado no diagrama de Lattice.



Por fim, mas explicação para a expressão instigante publicada por Cavallius: *“Em um laboratório totalmente blindado e autossuficiente em termos elétricos, qualquer ligação a terra seria desnecessária”*.

Esta expressão que se revela no nosso meio técnico como uma verdadeira quebra de paradigma sobre a necessidade do aterramento físico para os impulsos de alta frequência, pois como ficou demonstrado neste trabalho, que quando se utiliza uma malha de amortecimento em forma de grade cujas modulações de seus condutores são dimensionadas com os critérios técnicos aqui explicados, a conexão física com o solo pode não ser necessária.

As pesquisas desenvolvidas para o aprimoramento no conhecimento sobre as malhas de aterramento também proporcionaram a elaboração de um resgate histórico dos primeiros aterramentos, o qual facilitará o entendimento deste assunto para os profissionais interessados nesta área das instalações elétricas.